

文章编号: 0258-7025(2001)11-1024-03

# 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法

刘 诚 李银柱 李良钰 戴亚平 朱健强

(中国科学院上海光机所高功率激光物理国家实验室 上海 201800)

**摘要** 提出一种数字全息的零级衍射像消除方法,该方法不需要相移器材或其他辅助设备,直接利用图像处理手段对数字全息图进行数字处理,完全消除零级衍射像,有效改善真实像质量。

**关键词** 数字全息,零级像,图像处理

**中图分类号** TB 877 **文献标识码** A

## A New Way to Eliminate the Zero-order Image in Digital Holography

LIU Cheng LI Yin-zhu LI Liang-yu DAI Ya-ping ZHU Jian-qiang

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** The true image that can be used for recording microscopic objects in digital holography is improved by elimination of zero-order image with a digital way. The processing is done by mathematical methods without phase modulator or any other extra equipment. The basic principle and the verifying experiment are described too.

**Key words** digital holography, zero-order image, image processing

## 1 引言

数字全息技术早在30年前就由顾德门提出<sup>[1]</sup>,其具体原理是用光敏电子元件代替普通照相干版来记录全息图,用数字计算方式再现。但是由于当时计算机技术和电子记录器材的制约,多年来一直没有重要进展。随着计算机技术的进步和CCD等高质量数字光敏元件的出现,近来研究工作逐渐增多。用数字全息技术进行小尺度的三维形貌测量是近来研究工作的重点<sup>[2,3]</sup>,该方法除具有一般光测量技术的各种优点外,其突出之处就是高分辨率和高灵敏度,能同时获得物体的表面亮度分布和三维形貌分布,目前数字全息测量的横向分辨率小于1 μm,纵向分辨率为纳米<sup>[3]</sup>,可以广泛用于光纤、微电路和生物细胞等微观测量领域<sup>[4-6]</sup>,有着极为重要的意义。数字全息是以数字技术进行图像重建,重建结果直接显示在计算机屏幕上,所以屏幕上同时存在零级像、孪生像和真实像,这三束光线中除真实像以外,其他两者都是以杂散光形式出现,对测量往往造成不良影响;特别是零级像,由于占据了大部分能量

而在图像的当中形成一个又大又亮的亮斑,当重建图像在屏幕显示时造成真实像暗淡致使细节难以分辨,所以实际测量中有必要将其去除。现有的办法是用相移技术调整参考光的相位来记录多幅干涉图<sup>[7]</sup>,然后进行处理,从处理效果看,这种方法的去除效果并不理想,同时由于相移技术需要多次采集图像,增加了对环境稳定性和机械精度要求,同时增加测量手续。为此本文提出用图像处理方法,对CCD采集的结果直接处理,有效去除零级像,不增加测量复杂性。

## 2 基本原理

### 2.1 数字全息图频谱特性分析

数字全息的记录光路和普通平面全息相同,如图1所示,若参考光为 $xz$ 面内的平行光,振幅为 $R_0$ ,和 $z$ 轴的夹角为 $\theta$ ,其在 $x$ 方向的波数 $k_x = \sin(\theta)/\lambda$ , CCD记录的光强可以写为

$$I(x, y) = |o(x, y)|^2 + R_0^2 + R_0 O(x, y) \exp(-j2\pi k_x x) + R_0 O^*(x, y) \exp(j2\pi k_x x) \quad (1)$$

$O(x, y)$  表示 CCD 靶面上的物光, “\*”表示取共轭。

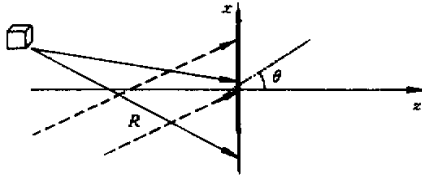


图 1 全息记录光路示意图

Fig.1 Schematic diagram for recording the off-axis holograms by CCD

全息图再现过程中衍射像的分离条件为  $I(x, y)$  的傅里叶变换谱三个互不重叠。对上式进行傅里叶变换得

$$\begin{aligned} \bar{I}(f_x, f_y) = \text{DFT}[I(x, y)] = & \bar{O}(f_x, f_y) \otimes \bar{O}^*(f_x, f_y) + \delta(f_x, f_y) + \\ & \bar{O}(f_x + K_0, f_y) + \bar{O}^*(f_x - K_0, f_y) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式中“—”表示相应量的傅里叶变换, 根据全息理论<sup>[8]</sup> 第一项表示物光谱的自相关, 若设物光的最高空间频率为  $\pm f_{\max}$ , 则第一项的半宽度为  $2f_{\max}$ ; 第二项是脉冲函数, 和第一项共同构成零级衍射像, 第三和第四项分别为真实像的频谱和共轭像的频谱, 它们相对于原点的平移量为参考光的  $x$  方向的空间频率  $\pm K_0$ , 其一维情况可以用图 2(a) 来示意, 图中粗线表示脉冲函数, 两个矩形表示真实像和共轭像

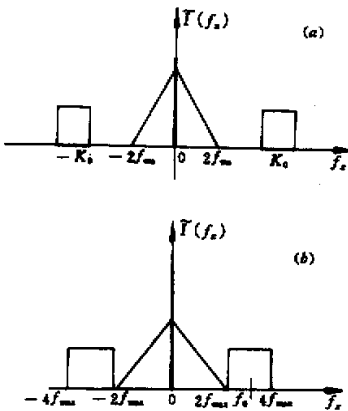


图 2 普通全息图的频谱(a)和数字全息图的频谱(b)分布特性

Fig.2 Schematic diagram of spectrum of ordinary hologram (a) and digital hologram (b)

的频谱分布, 矩形的宽度为  $2f_{\max}$ 。

用来记录全息图的 CCD 分辨率较低, 能够记录到的是空间频谱中较低的部分, CCD 的横向分辨率大概在  $10 \mu\text{m}$  左右, 极限分辨率为 100 线/mm, 但根据抽样定理要求, 一个条纹周期内采样点不能低于 4 个, 所以实际真正能记录到的空间最高频率只有 25 线/mm。为了能充分利用 CCD 的记录能力, 同时兼顾再现像分离条件, 一般安排光路使(2)式中的频谱为图 2(b) 所示, 即三种像的频谱相邻而不重合。此时  $4f_{\max} = 25$ , 真实像的频谱中心为  $f_0 = 18.8/\text{mm}$ , 真实像和共轭像的频谱宽度即图中矩形宽度  $\Delta f_x = 2f_{\max} = 12.5/\text{mm}$ 。

### 2.2 拉普拉斯算符对全息图处理

对(1)式表示的全息图用离散拉普拉斯算符处理<sup>[9]</sup>, 处理后的全息图为

$$\begin{aligned} I^{(1)}(x, y) = \nabla^2 I(x, y) = & \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial y^2} = \\ & [I(x+d, y) + I(x-d, y) + I(x, y+d) + \\ & I(x, y-d) - 4I(x, y)] \cdot (2d)^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

对上式两端做傅里叶变换并化简得

$$\begin{aligned} \text{DFT}[I^{(1)}(x, y)] = & \frac{\bar{I}(f_x, f_y)[2\cos(2\pi d f_x) + 2\cos(2\pi d f_y) - 4]}{2d} \end{aligned} \quad (4)$$

为讨论方便, 讨论其  $x$  方向

$$\begin{aligned} \text{DFT}[I^{(1)}(x)] = \bar{I}^{(1)}(f_x) = & \frac{\bar{I}(f_x)[2\cos(2\pi d f_x) - 2]}{2d} = \\ & \bar{I}(f_x) \frac{[\cos(2\pi d f_x) - 1]}{d} = \\ & 2\bar{I}(f_x) \frac{\sin^2(\pi d f_x)}{d} \end{aligned} \quad (5)$$

图 3 是(5)式的示意图。其中虚线表示函数  $\sin^2(\pi d f_x)$ , 能够看出它对初始全息图的频谱  $\bar{I}(f_x)$  有调整作用, 位于零频附近的零级像的频谱分量绝大部分被去除, 只剩下边界附近较弱的部分, 真实像的频谱和共轭像的频谱受到的影响较小, 可以确保再现像的准确性。

考查(5)式中的  $\sin^2(\pi d f_x)$ , 当此函数的极大值点即图 3 虚线最高点正对真实像的频谱中心时, 此函数和真实像频谱  $\bar{I}(f_x)$  的乘积对真实像的频谱分布形状影响最小(图 3 中所示的位置)。此时  $d f_0 = 1/2$ , 所以  $d = 0.5/f_0 = 0.5/18.8 = 1/37.6 \text{ mm}$ , 由于在(2)式离散拉普拉斯运算中,  $d$  表示参与运算

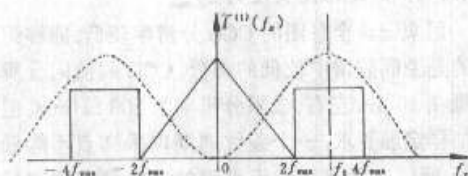


图3 经拉普拉斯运算处理后的全息图的频谱特性示意图

Fig.3 Schematic diagram of spectrum of disposed digital hologram

的像素点之间的间距,只能以像素为单位,国产的 CCD 在  $x$  方向像素宽度约  $11 \mu\text{m}$ ,所以  $d \approx 2.5$  像素,这是理论最佳参数值。实际操作中由于光路安排不可能完全达到图 2(b) 所示最佳状态,所以一般实验中取  $d = 2$  个或 3 个像素都会有良好的效果, $d$  取值过大时情况比较复杂,而且也没有实际意义,这里不作考虑。

### 3 实验

实验的拍摄光路如图 4 所示,He-Ne 激光经扩束器变为平行光入射到分束镜后分为两束,一束照射被记录物体,另一束照射反射镜  $M$ ,两束光被反射后再经过分束器照射到 CCD 靶面,形成离轴菲涅耳全息记录光路;被记录物体为镀有粗细、方向各不相同的条形铝膜的玻璃片,CCD 和计算机连接,反射镜  $M$  和垂直方向的夹角为  $2^\circ$ 。

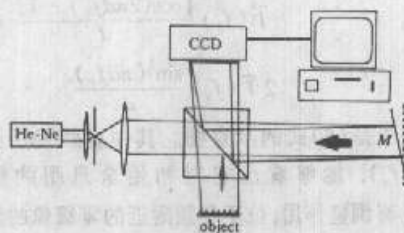


图4 实验光路图

Fig.4 Experimental setup

按图 4 光路记录的全息图如图 5 所示。为了便于比较,首先将此全息图直接代入文献[7]中的菲涅耳衍射再现公式进行再现,再现结果如图 6(a) 所示,其中存在直零级像(中间)、真实像(左上)和共轭像(右下),零级像很亮。将图 5 所示的全息图先代入(3)式进行处理,然后将处理结果  $I^{(1)}(x, y)$  代入

菲涅耳衍射再现公式再现,得到如图 6(b) 所示的结果。比较图 6(a) 和 (b) 可以发现,图 6(b) 中不存在零级像,真实像的清晰度提高。实验中参数  $d = 2$ 。



图5 CCD记录的全息图(部分)

Fig.5 Hologram recorded by CCD



图6 初始全息图的再现像(a)和处理后的全息图的再现像(b)

Fig.6 Constructed image from the original (a) and disposed hologram (b)

### 参考文献

- 1 J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 11(3):77-79
- 2 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms. *Appl. Opt.*, 1999, 38(34):6994-7001
- 3 E. Cuche, F. Bevilacqua, C. Depeursinge. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging. *Opt. Lett.*, 1999, 24(5):291-293
- 4 S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani *et al.*. Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography. *Appl. Opt.*, 1999, 38(34):7056-7062
- 5 Ichirou Yamaguchi, Tong Zhang. Phase-shifting digital holography. *Opt. Lett.*, 1997, 22(16):1268-1270
- 6 Ulf Schnars. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, 11(7):2011-2015
- 7 Yasuhiko Takaki, Hiroki Kawai, Hitoshi Ohzu. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images. *Appl. Opt.*, 1999, 38(23):4990-4996
- 8 Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Application*. Beijing: Publish House of Beijing Technology University, 1996 (in Chinese)
- 9 Yu Yinglin, Xu Yuanneng, Bai Yanlong. *Digital Image Processing*. Beijing: Peoples Post and Telecommunications Press, 1982 (in Chinese, Translated version)